

# **PEDOGEOQUÍMICA EM PERFIS DE ALTERAÇÃO NA REGIÃO DE LAVRAS (MG). II – ELEMENTOS MENORES E ELEMENTOS DAS TERRAS RARAS<sup>(1)</sup>**

**M. P. C. LACERDA<sup>(2)</sup>, H. ANDRADE<sup>(3)</sup> & J. J. G. QUÉMÉNEUR<sup>(4)</sup>**

## **RESUMO**

**Na região de Lavras, MG, analisou-se o comportamento geoquímico dos elementos menores (EM) e elementos das terras raras (ETR) ao longo da evolução pedogenética em perfis de solos com horizonte B textural, individualizados a partir de rochas de composição ácida, intermediária e básica do substrato. Nos perfis, realizaram-se análises químicas de EM e ETR, avaliando perdas e ganhos pelo balanço químico de massa. O estudo possibilitou o grupamento dos EM em duas classes: (a) mobilidade moderada a alta: perda da rocha fresca até o sólum; (b) mobilidade moderada: enriquecimento relativo e eventualmente real no sólum. O comportamento dos ETR revelou grande mobilidade ao longo da evolução dos perfis de alteração.**

**Termos de indexação: solos com horizonte B textural, espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), espectroscopia de emissão atômica com plasma de acoplamento indutivo (ICP), balanço químico, evolução pedológica.**

---

<sup>(1)</sup> Parte da Tese de Doutorado apresentada pela primeira autora ao Curso de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras – DCS-UFLA, com financiamento da FAPEMIG. Recebido para publicação em dezembro de 2000 e aprovado em agosto de 2001.

<sup>(2)</sup> Professora da Faculdade de Agronomia e Veterinária da Universidade de Brasília – FAV/UnB. Campus Darcy Ribeiro- ICC Sul. Caixa Postal 04508, CEP 70910-970 Brasília (DF). E-mail: marilusa@unb.br

<sup>(3)</sup> Professor do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras – UFLA. Caixa Postal 37, CEP 37200-000 Lavras (MG). E-mail: handrade@ufla.br

<sup>(4)</sup> Professor do Departamento de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais – DG/IGC/UFMG. Av. Antônio Carlos, 6.627, Caixa Postal 2.608, CEP 31270-901 Belo Horizonte (MG).

**SUMMARY:** *PEDOGEOCHEMICAL IN ALTERATION PROFILES IN THE REGION OF LAVRAS, MINAS GERAIS. II – TRACE ELEMENTS AND RARE EARTH ELEMENTS*

*The geochemical behavior of trace elements (TE) and rare earth elements (REE) was evaluated in the region of Lavras (MG), during the pedogenetic evolution in soil profiles with argillic horizons differentiated by acid, intermediate and basic compositions of the parent material. Chemical analyses of TE and REE were performed along the profiles and gains and losses were evaluated through mass chemical balance. The study allowed to group the TE into two classes: (a) moderate to high mobility: loss from the consolidated rocks to the solum; and (b) moderate mobility: relative and occasionally real enrichments in the solum. The REE showed a great mobility throughout the evolution of the alteration profiles.*

*Index terms: soils with argillic horizon, X-ray fluorescence spectrometry (XRF), atomic emission spectroscopy with inductive coupled plasm (ICP), chemical balance, pedological evolution.*

## INTRODUÇÃO

O ambiente natural de superfície é definido como a parte do globo terrestre cujas condições físico-químicas permitem a ação do intemperismo, onde as rochas primárias estarão em permanente desequilíbrio, especialmente quando entram em contato com as águas meteóricas. Mediante estudos pedogeoquímicos, é possível compreender a distribuição e migração dos elementos químicos e as reações químicas envolvidas durante os processos de alteração intempérica e formação dos solos no ambiente natural de superfície (Carvalho, 1995).

As águas meteóricas que atuam no intemperismo químico contêm quantidades variáveis de oxigênio e dióxido de carbono dissolvidos, que são suficientes para reagirem com a maioria dos minerais constituintes das rochas, fazendo com que sejam formadas novas fases minerais estáveis às novas condições físico-químicas (Carvalho, 1995). Neste processo de meteorização de rochas e formação dos solos, alguns elementos químicos são eliminados e outros são concentrados.

O trabalho clássico de Goldschmidt (1934) evidencia que o comportamento dos diversos íons em reações de meteorização pode ser diretamente correlacionado com o potencial iônico  $\phi = Z/r$ ; uma propriedade fundamental do elemento, relacionada com a eletronegatividade, em que  $Z$  = valência e  $r$  = raio iônico do elemento. Tal autor demonstrou que o potencial iônico pode explicar razoavelmente os fenômenos relacionados com a distribuição de elementos entre os sedimentos e águas naturais. Baseando no potencial iônico, Goldschmidt (1934, 1937) dividiu os elementos em três grupos: Grupo I - elementos (cátions) com baixo potencial iônico ( $< 3$ ), tais como: Na, K, Ca, Mg e outros (Cs, Rb, Ba, Pb, Sr, La,  $Mn^{2+}$ , Cu,  $Fe^{2+}$ , Li), que tendem a permanecer

em solução iônica, ainda que em valores de pH elevados, e geralmente são lixiviados do meio; Grupo II - elementos com potencial iônico maior que os do grupo I (entre 3 e 12), que se hidrolisam e precipitam com facilidade na forma de hidróxidos, tal como ocorre com o Be, Al, Ti, Zr, Cr e outros ( $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{4+}$ , Th, Lu, Y, Sc, V, Ga, Hf, Sn, Mo, Nb, Si, Ni) e concentram-se no *resíduo*, e Grupo III - inclui os elementos de potencial iônico maior que 12, que constituem ânions com o oxigênio e tendem a permanecer em solução iônica. É o caso dos elementos N, C, S, P e B, que em águas naturais formam ânions complexos, tais como  $NO_3^-$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $SO_4^{2-}$  e  $PO_4^{3-}$ .

O conceito de potencial iônico pode, então, explicar o comportamento dos elementos na meteorização de rochas e pedogênese, assinalando quais serão eliminados e quais serão concentrados (Besoain, 1985).

Com relação aos elementos das terras raras, estes têm sido referidos na bibliografia como resistentes ao fracionamento diante dos processos intempéricos (Nance & Taylor, 1977; Hanson, 1980; Henderson, 1984). Outros trabalhos, pelo contrário, têm mostrado que os elementos das terras raras podem ser submetidos a transporte e fracionamento significativos, especialmente ao longo do próprio perfil e perante intemperismo intenso (Nesbitt & Taylor, 1979; Duddy, 1980; Banfield & Eggleton, 1989; Formoso et al., 1989; Gasparetto & Menegotto, 1995).

A mobilidade dos elementos químicos durante os processos intempéricos é, então, significativa. Para avaliar a distribuição e migração desses elementos químicos ao longo da intemperização química, deve-se recorrer ao balanço químico de massa entre o material de origem e os produtos resultantes destas alterações. A determinação da mobilidade dos elementos químicos durante as alterações exógenas

permite o estabelecimento da sequência de mobilidade dos elementos em determinado ambiente e mesmo em diversos horizontes do perfil de alteração (Carvalho, 1995).

Para auxiliar a interpretação do comportamento dos elementos químicos, pode-se recorrer às suas características geoquímicas, descritas em diversas obras, sobretudo nas de Hawkes & Webb (1962), que abordam a ocorrência dos elementos nas rochas diversas, nos minerais primários e secundários, suas concentrações médias nestes e nos solos e na água, suas associações geoquímicas, além das condições de mobilidade no ambiente superficial.

Apesar da importância da Pedogeoquímica em estudos de meteorização de rochas e formação de solos, não existem trabalhos que contemplem tal tema na região de Lavras (MG). Por essa razão, realizaram-se estudos pedogeoquímicos nesta região, em perfis de alteração de solos com horizonte B textural, individualizados a partir da composição geoquímica ácida, intermediária e básica das rochas do substrato, com o objetivo de avaliar o comportamento geoquímico dos elementos menores e elementos das terras raras ao longo dos processos de alteração e pedogênese. Analisou-se a caracterização geoquímica dos perfis de alteração, desde a rocha fresca até o sólio, e avaliou-se o comportamento da mobilidade e distribuição dos elementos químicos analisados, bem como a quantificação de suas perdas e ganhos.

## MATERIAL E MÉTODOS

Procedeu-se à amostragem ao longo dos perfis de alteração, nas rochas e seus diferentes estádios de alteração e os solos sobre elas desenvolvidos, individualizados em seus horizontes. Foram, também, coletadas amostras indeformadas em todos os horizontes para a determinação da densidade global. Considerando o grau de evolução, os solos com horizonte B textural foram escolhidos para este estudo por preservarem as características químicas e mineralógicas das rochas originais. Os perfis de alteração foram criteriosamente selecionados a partir da discriminação litoquímica e petrológica dos domínios geológicos de origem (composição ácida, intermediária e básica), quando desenvolvidos em relevo ondulado a forte ondulado, condição de desenvolvimento desta classe de solos na região de Lavras, estabelecida em trabalhos de correlação geomorfopedológica por Andrade et al. (1998).

Os perfis selecionados foram: Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico - Perfil 1 (PVAd), formado a partir de rochas granitóides de composição granítica (rocha ígnea de composição ácida, teor de  $\text{SiO}_2 > 66\%$ ) do Domínio geológico intitulado Granito de Itutinga (Queméneur, 1995; Lacerda, 1999); Argissolo

Vermelho eutrófico - Perfil 2 (PVe), desenvolvido sobre diorito milonitizado (rocha ígnea de composição intermediária, com 55 a 66% de  $\text{SiO}_2$ ) do Domínio geológico Diorito do Rosário (Queméneur, 1995; Lacerda, 1999), e Chernossolo Argilúvico férreo - Perfil 3 (MTf), tendo como substrato um piroxenito granulitizado (rocha ígnea básica com teor de  $\text{SiO}_2$  entre 55 e 45%) do Domínio geológico denominado *Greenstone-belt* de Lavras (Queméneur, 1995; Lacerda, 1999).

As coordenadas geográficas dos perfis são: perfil 1 - Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico: 44°35'28"W e 21°17'50"S; perfil 2 - Argissolo Vermelho eutrófico: 44°53'00"W e 21°16'38"S, e perfil 3 - Chernossolo Argilúvico férreo: 45°02'56"W e 21°11'00"S.

## Análises geoquímicas

Nas análises geoquímicas, as amostras de rocha fresca e rocha alterada foram previamente britadas e pulverizadas em moinho de W no Centro de Pesquisas Manoel Teixeira da Costa/Instituto de Geociências/Universidade Federal de Minas Gerais - CPMTC/IGC/UFGM, individualizando-se alíquotas de cerca de 30 g. As amostras de solo foram secas ao ar e posteriormente pulverizadas manualmente em moinho de ágata até atingirem granulometria menor que 0,105 mm, com controle granulométrico por tamisação a seco (tamis de 150 #), sendo, também, individualizadas alíquotas de cerca de 30 g.

As análises geoquímicas foram efetuadas no CPMTTC/IGC/UFGM, utilizando-se métodos combinados de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX) e Espectroscopia de Emissão Atômica com Plasma de Acoplamento Indutivo (ICP).

Os elementos menores analisados foram: Ba, Ni, Cr, V, Co, Zn, Mo, Rb, Sr, Y, Cu, Zr, Nb e Pb. Analisaram-se, também, os seguintes elementos das terras raras: La, Ce, Nd, Sm, Gd, Dy, Ho, Er, Yb e Lu.

## Teores absolutos – balanço químico de massa

Para padronização analítica, os valores da densidade da amostra foram incorporados no cálculo de perdas e ganhos dos elementos da rocha original para os produtos alterados, de tal forma que se pudesse fixar a variação de volume. Foram, então, calculados os teores absolutos de cada componente químico de toda a sequência de alteração nos perfis 1, 2 e 3, utilizando os teores dos elementos obtidos por meio da análise química e a medida da densidade das respectivas amostras, tanto para os elementos menores quanto para os elementos das terras raras.

Para a avaliação quantitativa das perdas e ganhos dos elementos químicos durante os processos pedogenéticos, procederam-se aos cálculos de balanço químico de massa. Para efeito de cálculo, para os teores de elementos menores obtidos abaixo do limite de detecção do método analítico adotado, ou seja  $< 5 \text{ mg kg}^{-1}$  e  $< 10 \text{ mg kg}^{-1}$ , estabeleceram-se valores arbitrários de 3 e 5  $\text{mg kg}^{-1}$ , respectivamente.

Utilizou-se o cálculo isovolumétrico de balanço químico de massa proposto por Millot & Bonifas (1955) e Bonifas (1959) que permite determinar as perdas e ganhos em termos absolutos dos elementos constituintes do material, quando este é submetido à ação do intemperismo químico, pela expressão  $t\% = 100 \cdot [(d_a \cdot x_a / d_o \cdot x_o) - 1]$ ; em que  $t\%$  = taxa de mobilidade;  $d_a$  = densidade para o produto de alteração;  $d_o$  = densidade para o material original;  $x_a$  = teor do elemento no produto de alteração, e  $x_o$  = teor do elemento no material original. O valor de  $t$  define a percentagem de perda, quando negativo, e ganho, quando positivo, dos componentes químicos nos vários estádios de alteração em relação ao seu material original.

Este cálculo isovolumétrico (Millot & Bonifas, 1955; Bonifas, 1959) é utilizado quando se têm evidências de que a variação de volume é desprezível, revelando conservação da estrutura do material durante a alteração, sendo possível calcular a quantidade, em peso, de cada elemento por unidade de volume e compará-la com a quantidade no mesmo volume de rocha fresca.

O método foi utilizado com base nos estudos micropedológicos e mineralógicos realizados na mesma sequência de amostras destes perfis de alteração, cujos métodos e resultados encontram-se detalhados em Lacerda (1999) e Lacerda et al. (2000),

que permitiram aos autores diagnosticar razoável conservação de estrutura litológica nos estádios iniciais de alteração, ou seja, no alterito (horizontes pedológicos C). Na evolução da alteração, representada pelos horizontes de transição (horizonte BC) e sólum (horizonte B<sub>t</sub> e A), esses autores observaram feições indicativas de preservação de volume, tais como: *box works* e aumento gradativo na proporção de vazios em relação ao plasma + esqueleto no fundo matricial.

### Análises físicas

A determinação da densidade global foi efetuada pelo método do torrão parafinado (EMBRAPA, 1979a), com três repetições por amostra.

### Características físicas e mineralogia dos perfis de alteração

A mineralogia da sequência de alteração destes perfis e suas características físicas foram analisadas por Lacerda (1999) e Lacerda et al. (2000). O quadro 1 resume as principais características físicas destes perfis.

Os fácies rocha-fresca dos perfis estudados apresentam a seguinte composição mineralógica:

- Perfil 1 (PVAd) - granitóide - mineralogia essencial: feldspato potássico (30%), plagioclásio (35%), quartzo (25%), biotita e anfibólio relictual da série

**Quadro 1. Características físicas dos perfis 1, 2 e 3**

Amostra	Horizonte	Profundidade	Areia	Silte	Argila	Silte/Argila	Classificação textural		D
							SBCS <sup>(1)</sup>	EMBRAPA <sup>(2)</sup>	
		cm	g kg <sup>-1</sup>						kg dm <sup>-3</sup>
Perfil 1 – Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd)									
A	A	0-55	500	320	180	1,78	fr	médio	1,38
B	B <sub>t</sub>	55-95	560	230	210	1,09	fr-arg-aren	médio	1,35
BC	BC	95-130	520	360	120	3,00	fr-aren	médio	1,27
C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	130-210	660	280	60	4,67	fr-aren	médio	1,31
C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	210-310	620	330	50	6,60	fr-aren	médio	1,25
Perfil 2 – Argissolo Vermelho eutrófico (PVe)									
A	A	0-20	300	400	300	1,34	fr-arg	médio	1,28
B	B <sub>t</sub>	20-80	200	440	360	1,22	fr-arg a fr-arg-silt	médio a argiloso	1,47
BC	BC	80-130	240	590	170	3,47	fr-silt	médio	0,97
C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	130-260	260	650	90	7,22	fr-silt	médio	1,07
C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	260-430	260	670	70	9,57	fr-silt	médio	1,06
C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	430-450	320	600	80	7,50	fr-silt	médio	1,18
Perfil 3 – Chernossolo Argilúvico férrico (MTf)									
A	A	0-18	480	360	160	2,25	fr	médio	1,25
B	B <sub>t</sub>	18-55	140	340	520	0,65	arg	argiloso	1,45
BC	BC	55-85	200	390	410	0,95	arg	argiloso	1,09
C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	85-120	560	320	120	2,67	fr-aren	médio	1,09
C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	120-230	700	260	40	6,50	fr-aren	médio	1,51
C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	230+	740	220	40	5,50	areia-fr	arenoso	2,16

D = densidade global do solo, arg = argiloso, fr = franco, silt = siltoso, aren = arenoso. <sup>(1)</sup> Classes texturais do material constitutivo de horizontes e perfis de solos, segundo Lemos & Santos (1984), adotadas pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – SBCS.

<sup>(2)</sup> Classificação textural simplificada, segundo EMBRAPA (1979b).



hornblenda-edenita (5%); mineralogia secundária (5%): biotita, epidoto da série zoisita-pistacita e zoisita-clinozoisita, moscovita, sericita, carbonato, titanita, clorita e óxidos de ferro, e mineralogia acessória: zircão e allanita.

- Perfil 2 (PVe) - diorito milonitizado - mineralogia essencial: plagioclásio (40%), anfibólio da série hornblenda-edenita (20%), quartzo (9%) e feldspato potássico (traços); mineralogia secundária: epidoto da série zoisita-pistacita (15%), biotita (5%), titanita (5%), sericita (5%) e clorita (1%), e mineralogia acessória: zircão, apatita e óxidos de ferro e titânio.

- Perfil 3 (MTf) - piroxenito granulizado - mineralogia essencial: clinopiroxênio da série diopsídio-augita (30%), anfibólio da série hornblenda-edenita (30%), plagioclásio (35%) e quartzo (traços); mineralogia secundária (5%): anfibólio da série tremolita-actinolita/uralita, sericita, óxidos de ferro e de titânio, e mineralogia acessória: apatita.

A associação de argilominerais silicatados mostra a seguinte constituição:

- Perfil 1 (PVAd): illita (nos horizontes C, BC e B<sub>t</sub>) e caulinita + gibbsita (ambos nos horizontes C, BC, B<sub>t</sub> e A).

- Perfil 2 (PVe): illita (nos horizontes C e BC), vermiculita com hidróxi nas entrecamadas + caulinita (ambos nos horizontes C, BC, B<sub>t</sub> e A) e gibbsita (desenvolvendo-se a partir do horizonte BC).

- Perfil 3 (MTf): caulinita + talco + esmectita (horizontes C<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>1</sub>, BC, B<sub>t</sub> e A).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos pela análise química pela FRX e ICP para os perfis 1 (PVAd), 2 (PVe) e 3 (MTf) encontram-se listados nos quadros 2 (elementos menores), e 3 (elementos das terras raras). As amostras referem-se aos horizontes pedogenéticos A, B (considerados como fácies sólum), BC (considerado como fácies de transição) e C (considerado como fácies alterito). R<sub>1</sub> corresponde ao fácies rocha alterada e R ao fácies rocha fresca de origem.

Os quadros 4 e 5 apresentam os teores absolutos dos elementos traços e elementos das terras raras, respectivamente. Como a densidade da amostra é uma propriedade que reflete o grau de alteração de maneira sensível, foram elaborados diagramas de

**Quadro 2. Dados analíticos (FRX e ICP) dos elementos menores - Perfis 1, 2 e 3**

Amostra	Profundidade	Ba	Ni	Cr	V	Co	Zn	Mo	Rb	Sr	Y	Cu	Zr	Nb	Pb
	cm	mg kg <sup>-1</sup>													
Perfil 1 – Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd)															
A	0-55	414	15	25	40	14	48	8	210	36	22	17	159	11	31
B	55-95	389	16	25	40	14	49	8	215	37	23	18	153	12	31
BC	95-130	386	15	25	40	14	49	8	227	35	22	17	147	11	32
C <sub>1</sub>	130-210	486	16	24	32	12	47	8	253	41	24	20	117	12	34
C <sub>2</sub>	210-310	478	13	26	39	14	49	8	239	37	24	17	141	11	32
R <sub>1</sub>	310+	850	11	101	12	< 5	48	< 5	309	38	56	5	144	30	50
R		710	< 5	180	12	< 5	75	< 5	250	116	57	< 5	133	30	43
Perfil 2 – Argissolo Vermelho eutrófico (PVe)															
A	0-20	643	36	54	134	30	48	6	25	40	15	34	150	8	19
B	20-80	633	36	58	152	34	46	6	18	25	15	34	132	8	18
BC	80-130	680	32	53	129	32	53	7	31	32	17	33	136	9	19
C <sub>1</sub>	130-260	852	31	55	121	28	51	7	37	35	16	37	129	9	19
C <sub>2</sub>	260-430	646	36	49	114	28	52	6	38	41	15	27	124	9	18
C <sub>3</sub>	430-450	1.160	32	53	95	24	51	7	43	35	16	23	107	9	20
R <sub>1</sub>	450+	444	20	68	127	24	52	< 5	7	550	36	45	127	21	< 5
R		574	14	68	132	24	44	< 5	14	494	15	40	126	7	< 5
Perfil 3 – Chernossolo Argilúvico férrico (MTf)															
A	0-18	250	160	438	225	55	46	< 5	< 10	17	9	45	55	5	14
B	18-55	272	159	302	232	57	45	5	< 10	17	10	51	57	6	13
BC	55-85	269	138	229	228	57	44	< 5	< 10	16	9	32	48	5	13
C <sub>1</sub>	85-120	246	131	224	223	50	45	5	< 10	22	11	29	54	6	14
C <sub>2</sub>	120-230	174	121	204	170	42	46	< 5	< 10	22	10	8	51	6	14
C <sub>3</sub>	230+	122	107	78	135	36	46	< 5	< 10	31	11	11	53	6	14
R		17	234	1182	266	42	76	< 5	8	107	28	55	35	7	5

Sendo: A = horizonte A (fácies sólum), B = horizonte Bt (fácies sólum), BC = horizonte BC (fácies de transição), C = horizontes C (fácies alterito), R<sub>1</sub> = fácies rocha alterada, R = fácies rocha fresca de origem.

**Quadro 3. Dados analíticos (ICP) dos elementos das terras raras - Perfis 1, 2 e 3**

Amostra	Profundidade	La	Ce	Nd	Sm	Gd	Dy	Ho	Er	Yb	Lu
	cm	mg kg <sup>-1</sup>									
Perfil 1 – Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd)											
A	0-55	37,20	76,00	46,30	7,50	5,10	4,60	1,10	3,40	1,60	0,50
B	55-95	43,90	91,40	51,90	6,00	5,70	4,60	0,30	3,30	1,60	0,40
BC	95-130	47,40	77,40	58,30	10,30	5,80	4,50	0,70	3,50	1,40	0,40
C <sub>1</sub>	130-210	41,40	51,10	45,70	7,60	5,00	3,90	1,00	3,60	1,30	0,50
C <sub>2</sub>	210-310	90,90	73,80	108,90	21,30	8,50	6,90	1,70	4,80	2,60	0,60
R <sub>1</sub>	310+	15,70	41,20	28,10	3,90	4,80	3,50	0,40	3,50	1,00	0,50
R		33,60	76,70	47,60	10,00	7,30	6,00	2,00	5,00	1,60	0,70
Perfil 2 – Argissolo Vermelho eutrófico (PVe)											
A	0-20	30,40	72,00	47,40	11,40	6,10	5,10	0,80	3,70	2,00	0,70
B	20-80	44,40	85,80	72,00	17,20	8,00	7,40	1,30	5,40	3,30	0,80
BC	80-130	76,00	140,30	119,60	27,00	13,80	13,10	3,80	9,20	6,60	1,30
C <sub>1</sub>	130-260	34,80	79,00	52,50	10,20	6,40	5,50	1,80	4,40	2,40	0,80
C <sub>2</sub>	260-430	37,30	89,30	53,80	10,30	6,50	5,40	0,90	3,80	2,20	0,70
C <sub>3</sub>	430-450	26,90	53,40	42,20	6,70	5,40	4,30	0,30	3,90	1,50	0,50
R <sub>1</sub>	450+	24,10	55,20	43,90	8,30	7,70	5,20	0,60	4,00	1,80	0,70
R		23,60	53,00	45,20	7,30	8,30	5,90	1,20	4,50	2,50	0,70
Perfil 3 – Chernossolo Argilúvico férrico (MTf)											
A	0-18	12,70	32,10	28,10	3,50	6,10	4,60	1,20	4,10	1,80	0,80
B	18-55	10,30	31,80	27,00	5,40	5,20	4,50	0,30	3,90	1,80	0,90
BC	55-85	9,20	29,10	30,40	5,40	5,80	5,00	1,50	4,40	2,10	0,90
C <sub>1</sub>	85-120	10,30	25,10	36,20	8,30	7,80	7,30	1,40	5,70	3,40	1,10
C <sub>2</sub>	120-230	7,30	10,90	17,60	5,30	4,20	4,40	1,20	2,70	2,30	0,50
C <sub>3</sub>	230+	8,10	12,20	18,20	5,20	4,40	5,20	1,40	3,20	3,10	0,50
R		7,60	13,80	11,20	2,90	2,80	2,30	0,70	1,60	1,20	0,30

Sendo: A = horizonte A (fácies sólum), B = horizonte Bt (fácies sólum), BC = horizonte BC (fácies de transição), C = horizontes C (fácies alterito), R<sub>1</sub> = fácies rocha alterada, R = fácies rocha fresca de origem.

teor absoluto dos elementos menores e elementos das terras raras versus densidade para os perfis 1, 2 e 3 (Figuras 1, 2, 3, 4, 5 e 6). Nestes diagramas, a densidade representa os diversos fácies de alteração avaliados ao longo dos perfis estudados, de acordo com a correspondência demonstrada nos quadros 4 e 5.

Os valores de perdas e ganhos dos elementos menores e elementos das terras raras encontrados pelo balanço químico de massa nos perfis 1, 2 e 3 encontram-se nos quadros 6 e 7, respectivamente.

### Elementos menores

Os teores absolutos dos elementos menores (Quadro 4), os diagramas de sua distribuição de acordo com a densidade, correspondendo à sequência da evolução da alteração ao longo dos perfis 1, 2 e 3 (Figuras 1, 2 e 3), juntamente com o balanço químico (Quadro 6), permitem fazer as seguintes interpretações:

**Ba** - O teor absoluto de Ba varia significativamente nos perfis 1, 2 e 3, com perda moderada, porém com variações ao longo da sequência de alteração intempérica, atingindo, no balanço químico, cerca de 73 e 59% de perda em relação à rocha fresca de origem nos perfis 1 (PVAd) e 2 (PVe), respectivamente.

No entanto, no perfil 3 (MTf), o Ba apresenta ganho crescente da rocha fresca ao sólum, atingindo 675,92% de ganho no horizonte B<sub>t</sub> (Quadros 4 e 6, Figuras 1, 2 e 3).

**Sr e Rb** - O Sr apresenta perda geralmente acentuada dos fácies de alteração rocha fresca/rocha alterada ao alterito, permanecendo a valores pouco variáveis a partir do alterito em direção ao sólum, atingindo valores de perda de 85,21, 97,77 e 94,55%, respectivamente, nos perfis 1, 2 e 3 (Quadros 4 e 6, Figuras 1, 2 e 3).

O Rb apresenta comportamento semelhante ao Sr no perfil 1 (PVAd), atingindo 55,48% de perda ao balanço químico no horizonte BC e, no perfil 3 (MTf), a perda da rocha fresca ao alterito é moderada, com maior percentagem de perda (-77,22%) nos horizontes C<sub>1</sub> e BC. Já no perfil 2 (PVe), verifica-se pequeno incremento da rocha fresca ao alterito (+28,52%) após uma perda no fácies de alteração rocha alterada (-53,90%) e, a partir do alterito em direção ao sólum, os valores absolutos variam pouco, refletindo no balanço químico ganhos discretos até o horizonte C<sub>1</sub>, seguidos de perdas de até 32,98% no horizonte B<sub>t</sub> (Quadros 4 e 6, Figuras 1, 2 e 3).

**Zr** - O Zr mostra decréscimo dos teores absolutos ao longo das sequências de alteração nos perfis

**Quadro 4. Teores absolutos dos elementos menores – Perfis 1, 2 e 3**

Amostra	D	Ba	Rb	Sr	Zr	Ni	Cr	Co
	kg dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>						
Perfil 1 – Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd)								
A	1,38	571,32	289,80	49,68	219,42	20,70	34,50	19,32
B	1,35	525,15	290,25	49,95	206,55	21,60	33,75	18,90
BC	1,27	490,22	288,29	44,45	186,69	19,05	31,75	17,78
C <sub>1</sub>	1,31	636,66	331,43	53,71	153,27	20,96	31,44	15,72
C <sub>2</sub>	1,25	597,50	298,75	46,25	176,25	16,25	32,50	17,50
R <sub>1</sub>	2,28	1938,00	704,52	86,64	328,32	25,08	230,28	6,84
R	2,59	1838,90	647,50	300,44	344,47	7,77	466,20	7,77
Perfil 2 – Argissolo Vermelho eutrófico (PVe)								
A	1,28	823,04	32,00	51,20	192,00	46,08	69,12	38,40
B	1,47	930,51	26,46	36,75	194,04	52,92	85,26	49,98
BC	0,97	659,60	30,07	31,04	131,92	31,04	51,41	31,04
C <sub>1</sub>	1,07	911,64	39,59	37,45	138,03	33,17	58,85	29,96
C <sub>2</sub>	1,06	684,76	40,28	43,46	131,44	38,16	51,94	29,68
C <sub>3</sub>	1,18	1368,8	50,74	41,30	126,26	37,76	62,54	28,32
R <sub>1</sub>	2,6	1154,4	18,20	1430,00	330,20	52,00	176,80	62,40
R	2,82	1618,68	39,48	1393,08	355,32	39,48	191,76	67,58
Perfil 3 – Chernossolo Argilúvico férrico (MTf)								
A	1,25	312,50	6,25	21,25	68,75	200,00	547,50	68,75
B	1,45	394,40	7,25	24,65	82,65	230,55	437,90	82,65
BC	1,09	293,21	5,45	17,44	52,32	150,42	249,61	62,13
C <sub>1</sub>	1,09	268,14	5,45	23,98	58,86	142,79	244,16	54,50
C <sub>2</sub>	1,51	262,74	7,55	33,22	77,01	182,71	308,04	63,42
C <sub>3</sub>	2,16	263,52	10,80	66,96	114,48	231,12	168,48	77,76
R	2,99	50,83	23,92	319,93	104,65	699,66	3534,18	125,58
		Cu	Zn	V	Mo	Y	Nb	Pb
Perfil 1 – Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd)								
A	1,38	23,46	66,24	55,20	11,04	30,36	15,18	42,78
B	1,35	24,30	66,15	54,00	10,80	31,05	16,20	41,85
BC	1,27	21,59	62,23	50,80	10,16	27,94	13,97	40,64
C <sub>1</sub>	1,31	26,20	61,57	41,92	10,48	31,44	15,72	44,54
C <sub>2</sub>	1,25	21,25	61,25	48,75	10,00	30,00	13,75	40,00
R <sub>1</sub>	2,28	11,40	109,44	27,36	6,84	6,84	68,40	114,00
R	2,59	7,77	194,25	31,08	7,77	147,63	77,70	111,37
Perfil 2 – Argissolo Vermelho eutrófico (PVe)								
A	1,28	43,52	61,44	171,52	7,68	19,20	10,24	24,32
B	1,47	49,98	67,62	223,44	8,82	22,05	11,76	26,46
BC	0,97	32,01	51,41	125,13	6,79	16,49	8,73	18,43
C <sub>1</sub>	1,07	39,59	54,57	129,47	7,49	17,12	9,63	20,33
C <sub>2</sub>	1,06	28,62	55,12	120,84	6,36	15,90	9,54	19,08
C <sub>3</sub>	1,18	27,14	60,18	112,10	8,26	18,88	10,62	23,60
R <sub>1</sub>	2,6	117,00	135,20	330,20	7,80	93,60	54,60	7,80
R	2,82	112,80	124,08	372,24	8,46	42,30	19,74	8,46
Perfil 3 – Chernossolo Argilúvico férrico (MTf)								
A	1,25	56,25	57,50	281,25	3,75	11,25	6,25	17,50
B	1,45	73,95	65,25	336,40	7,25	14,50	8,70	18,85
BC	1,09	34,88	47,96	248,52	3,27	9,81	5,45	14,17
C <sub>1</sub>	1,09	31,61	49,05	243,07	5,45	11,99	6,54	15,26
C <sub>2</sub>	1,51	12,08	69,46	256,70	4,53	15,1	9,06	21,14
C <sub>3</sub>	2,16	23,76	99,36	291,60	6,48	23,76	12,96	30,24
R	2,99	164,58	227,24	795,34	8,97	83,72	8,97	14,95

Sendo: A = horizonte A (fácies solum), B = horizonte Bt (fácies solum), BC = horizonte BC (fácies de transição), C = horizontes C (fácies alterito), R<sub>1</sub> = fácies rocha alterada, R = fácies rocha fresca de origem. D = densidade global.

**Quadro 5. Teores absolutos dos elementos das terras raras - Perfis 1, 2 e 3**

Amostra	D	La	Ce	Nd	Sm	Gd	Dy	Ho	Er	Yb	Lu
	kg dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>									
Perfil 1 – Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd)											
A	1,38	51,34	104,88	63,89	10,35	7,04	6,35	1,52	4,69	2,21	0,69
B	1,35	59,27	123,39	70,07	8,10	7,70	6,21	0,41	4,46	2,16	0,54
BC	1,27	60,20	98,30	74,04	13,08	7,37	5,72	0,89	4,45	1,78	0,51
C <sub>1</sub>	1,31	54,23	66,94	59,87	9,96	6,55	5,11	1,31	4,72	1,70	0,66
C <sub>2</sub>	1,25	113,63	92,25	136,13	26,63	10,63	8,63	2,13	6,00	3,25	0,75
R <sub>1</sub>	2,28	35,80	93,94	64,07	8,89	10,94	7,98	0,91	7,98	2,28	1,14
R	2,59	87,02	198,65	123,28	25,90	18,91	15,54	5,18	12,95	4,14	1,81
Perfil 2 – Argissolo Vermelho eutrófico (PVe)											
A	1,28	38,91	92,16	60,67	14,59	7,81	6,53	1,02	4,74	2,56	0,90
B	1,47	65,27	126,13	105,84	25,28	11,76	10,88	1,91	7,94	4,85	1,18
BC	0,97	73,72	136,09	116,01	26,19	13,39	12,71	3,69	8,92	6,40	1,26
C <sub>1</sub>	1,07	37,24	84,53	56,18	10,91	6,85	5,89	1,93	4,71	2,57	0,86
C <sub>2</sub>	1,06	39,54	94,66	57,03	10,92	6,89	5,72	0,95	4,03	2,33	0,74
C <sub>3</sub>	1,18	31,74	63,01	49,80	7,91	6,37	5,07	0,35	4,60	1,77	0,59
R <sub>1</sub>	2,60	62,66	143,52	114,14	21,58	20,02	13,52	1,56	10,40	4,68	1,82
R	2,82	66,55	149,46	127,46	20,59	23,41	16,64	3,38	12,69	7,05	1,97
Perfil 3 – Chernossolo Argilúvico férrico (MTf)											
A	1,25	15,88	40,13	35,13	4,38	7,63	5,75	1,50	5,13	2,25	1,00
B	1,45	14,94	46,11	39,15	7,83	7,54	6,53	0,44	5,66	2,61	1,31
BC	1,09	10,03	31,72	33,14	5,89	6,32	5,45	1,64	4,80	2,29	0,98
C <sub>1</sub>	1,09	11,23	27,36	39,46	9,05	8,50	7,96	1,53	6,21	3,71	1,20
C <sub>2</sub>	1,51	11,02	16,46	26,58	8,00	6,34	6,64	1,81	4,08	3,47	0,76
C <sub>3</sub>	2,16	17,50	26,35	39,31	11,23	9,50	11,23	3,02	6,91	6,70	1,08
R	2,99	22,72	41,26	33,49	8,67	8,37	6,88	2,09	4,78	3,59	0,90

Sendo: A = horizonte A (fácies sólum), B = horizonte Bt (fácies sólum), BC = horizonte BC (fácies de transição), C = horizontes C (fácies alterito), R<sub>1</sub> = fácies rocha alterada, R = fácies rocha fresca de origem. D = densidade global.

estudados, que se apresenta acentuado nos estádios iniciais da alteração, da rocha fresca/rocha alterada até o alterito (Quadro 4, Figuras 1, 2 e 3). Analisando o balanço químico (Quadro 6), as perdas em relação à rocha fresca de origem atingem 55,51; 64,47 e 50% nos perfis 1, 2 e 3, respectivamente. A partir do horizonte de transição BC, verifica-se acréscimo nos teores absolutos no sólum, especialmente no horizonte B<sub>t</sub>, o que, no balanço químico, reflete-se nos menores valores de perda, indicando enriquecimento relativo (Quadros 4 e 6).

**Ni, Cr, Co, Cu, V e Zn** - Nos perfis 2 (PVe) e 3 (MTf), estes elementos geralmente mostram incremento em seus teores absolutos, a partir do alterito em direção ao sólum, que se pronuncia no horizonte B<sub>t</sub>, com subsequente decréscimo em direção ao horizonte A (com exceção do Cr no perfil 3, cujo acréscimo prossegue rumo ao horizonte A). Esse incremento no sólum ocorre após decréscimo crescente, por vezes acentuado, nos estádios iniciais da alteração, ou seja, dos fácies de alteração rocha fresca/rocha alterada ao alterito (Quadro 4 e Figuras 1, 2 e 3).

No perfil 3 (MTf), observa-se decréscimo crescente desses elementos da rocha fresca ao horizonte de transição BC, com exceção do Cr e Cu.

No perfil 2 (PVe), nota-se perda mais acentuada da rocha fresca/rocha alterada ao alterito (horizonte C<sub>3</sub>) para o V, Cr, Cu e Zn e estes, juntamente com os demais, permanecem em valores absolutos com pequenas variações a partir do alterito até o horizonte BC (Quadro 4 e Figuras 1, 2 e 3).

Já no perfil 1 (PVAd), verifica-se acréscimo nos teores absolutos desses elementos, geralmente crescente, com algumas variações ao longo dos horizontes, desde a rocha fresca até o sólum, com exceção do Cr e Zn. O subsequente decréscimo no horizonte A após acréscimo no horizonte B<sub>t</sub> é discretamente verificado somente para o Cu e Ni (Quadro 4 e Figuras 1, 2 e 3).

O balanço químico (Quadro 6) permite quantificar a mobilidade desses elementos químicos. No perfil 1 (PVAd), verificam-se ganhos de Ni, Co, Cu e V ao longo de praticamente toda a sequência de alteração, geralmente a partir do alterito, atingindo, respectivamente, percentagens de ganho de +177,99, +148,65, +237,19 e +77,61%, sendo esses maiores enriquecimentos preferencialmente no sólum. O Cr e o Zn apresentam perdas da ordem de 93 e 67%, respectivamente.

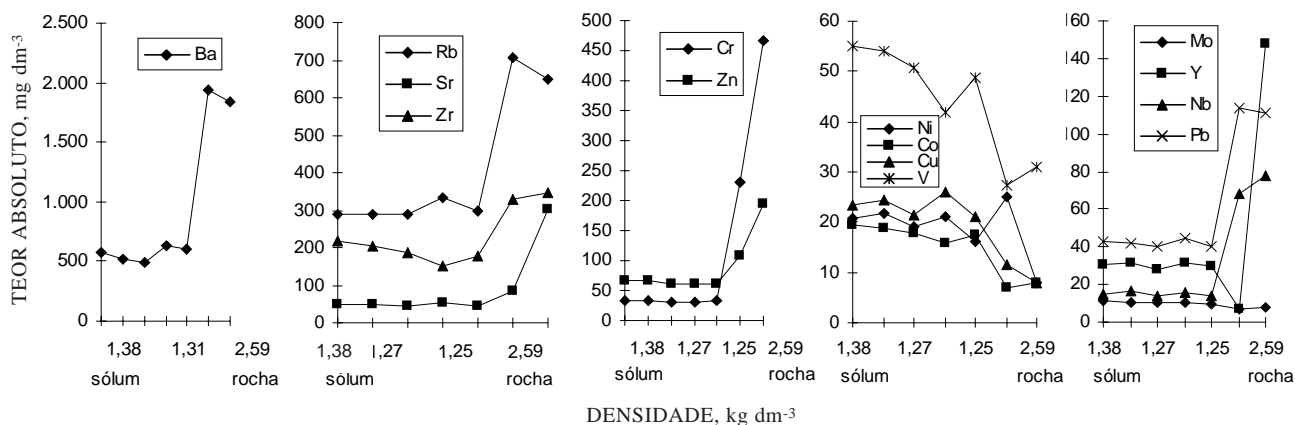
No perfil 2 (PVe), observa-se o ganho de Ni nos horizontes B<sub>t</sub> e A (34,04 e 16,72%, respectivamente)



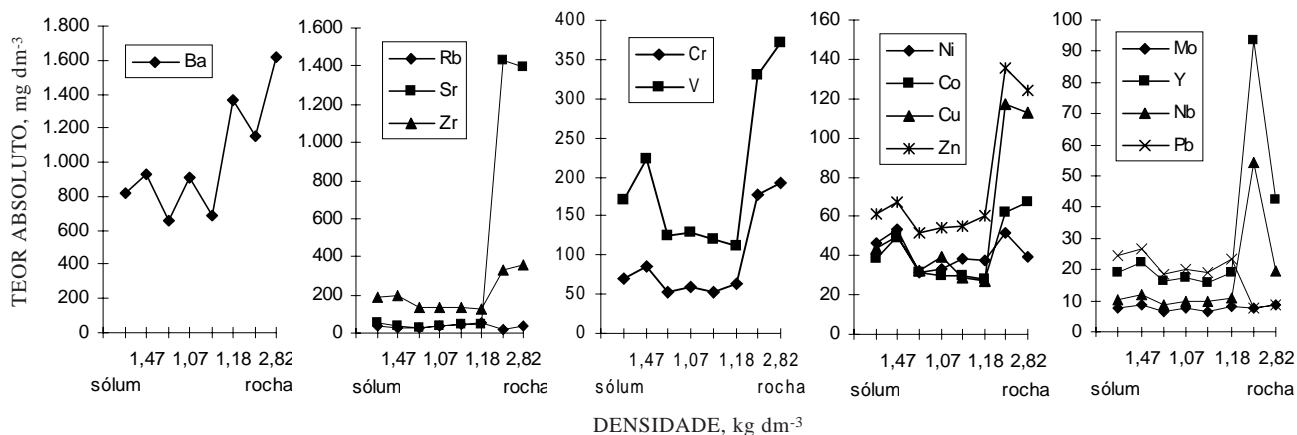
**Quadro 6. Balanço químico (isovolumétrico) para os elementos menores - Perfis 1, 2 e 3**

Amostra	D	Ba	Rb	Sr	Zr	Ni	Cr	Co
	kg dm <sup>-3</sup>	%						
Perfil 1 – Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd)								
A	1,38	-68,93	-55,24	-83,46	-36,30	166,41	-92,60	148,65
B	1,35	-71,44	-55,17	-83,37	-40,04	177,99	-92,76	143,24
BC	1,27	-73,34	-55,48	-85,21	-45,80	145,17	-93,19	128,83
C <sub>1</sub>	1,31	-65,38	-48,81	-82,12	-55,51	169,76	-93,26	102,32
C <sub>2</sub>	1,25	-67,51	-53,86	-84,61	-48,83	109,14	-93,03	125,23
R <sub>1</sub>	2,28	5,39	8,81	-71,16	-4,69	222,78	-50,60	-11,97
R	2,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Perfil 2 – Argissolo Vermelho eutrófico (PVe)								
A	1,28	-49,15	-18,95	-96,32	-45,96	16,72	-63,95	-43,26
B	1,47	-42,51	-32,98	-97,36	-45,39	34,04	-55,54	-26,15
BC	0,97	-59,25	-23,83	-97,77	-62,87	-21,38	-73,19	-54,14
C <sub>1</sub>	1,07	-43,68	0,28	-97,31	-61,15	-15,98	-69,31	-55,73
C <sub>2</sub>	1,06	-57,70	2,03	-96,88	-63,01	-3,34	-72,91	-56,58
C <sub>3</sub>	1,18	-15,44	28,52	-97,04	-64,47	-4,36	-67,39	-58,16
R <sub>1</sub>	2,6	-28,68	-53,90	2,65	-7,07	31,71	-7,80	-7,80
R	2,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Perfil 3 – Chernossolo Argilúvico férrico (MTf)								
A	1,25	514,79	-73,87	-93,36	-34,30	-71,41	-84,51	-45,25
B	1,45	675,92	-69,69	-92,30	-21,02	-67,05	-87,61	-34,19
BC	1,09	476,84	-77,22	-94,55	-50,00	-78,50	-92,94	-50,53
C <sub>1</sub>	1,09	427,52	-77,22	-92,50	-43,76	-79,59	-93,09	-56,60
C <sub>2</sub>	1,51	416,90	-68,44	-89,62	-26,41	-73,89	-91,28	-49,50
C <sub>3</sub>	2,16	418,43	-54,85	-79,07	9,39	-66,97	-95,23	-38,08
R	2,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		Cu	Zn	V	Mo	Y	Nb	Pb
Perfil 1 – Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd)								
A	1,38	201,93	-65,89	77,61	42,08	-79,44	-80,46	-61,59
B	1,35	212,74	-65,94	73,75	39,00	-78,97	-79,15	-62,42
BC	1,27	177,86	-67,96	63,45	30,76	-81,07	-82,02	-63,51
C <sub>1</sub>	1,31	237,19	-68,30	34,88	34,88	-78,70	-79,77	-60,01
C <sub>2</sub>	1,25	173,49	-68,46	56,85	28,70	-79,68	-82,30	-64,08
R <sub>1</sub>	2,28	47,72	-43,65	-11,97	-11,97	-95,37	-11,97	2,36
R	2,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Perfil 2 – Argissolo Vermelho eutrófico (PVe)								
A	1,28	-64,93	-50,48	-53,92	-9,22	-54,61	-48,13	187,47
B	1,47	-59,72	-45,50	-39,97	4,26	-47,87	-40,43	212,77
BC	0,97	-74,20	-58,57	-66,38	-19,74	-61,02	-55,78	117,85
C <sub>1</sub>	1,07	-68,09	-56,02	-65,22	-11,47	-59,53	-51,22	140,31
C <sub>2</sub>	1,06	-76,93	-55,58	-67,54	-24,82	-62,41	-51,67	125,53
C <sub>3</sub>	1,18	-78,13	-51,50	-69,89	-2,36	-55,37	-46,20	178,96
R <sub>1</sub>	2,6	-5,71	8,96	-11,29	-7,80	121,28	176,60	-7,80
R	2,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Perfil 3 – Chernossolo Argilúvico férrico (MTf)								
A	1,25	-65,80	-74,70	-64,64	-58,19	-86,56	-30,32	17,06
B	1,45	-55,03	-71,29	-57,70	-19,18	-82,68	-3,01	26,09
BC	1,09	-78,79	-78,89	-68,75	-63,55	-88,28	-39,24	-5,22
C <sub>1</sub>	1,09	-80,78	-78,41	-69,44	-39,24	-85,68	-27,09	2,07
C <sub>2</sub>	1,51	-92,65	-69,43	-67,72	-49,50	-81,96	1,00	41,40
C <sub>3</sub>	2,16	-85,55	-56,28	-63,34	-27,76	-71,62	44,48	102,27
R	2,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

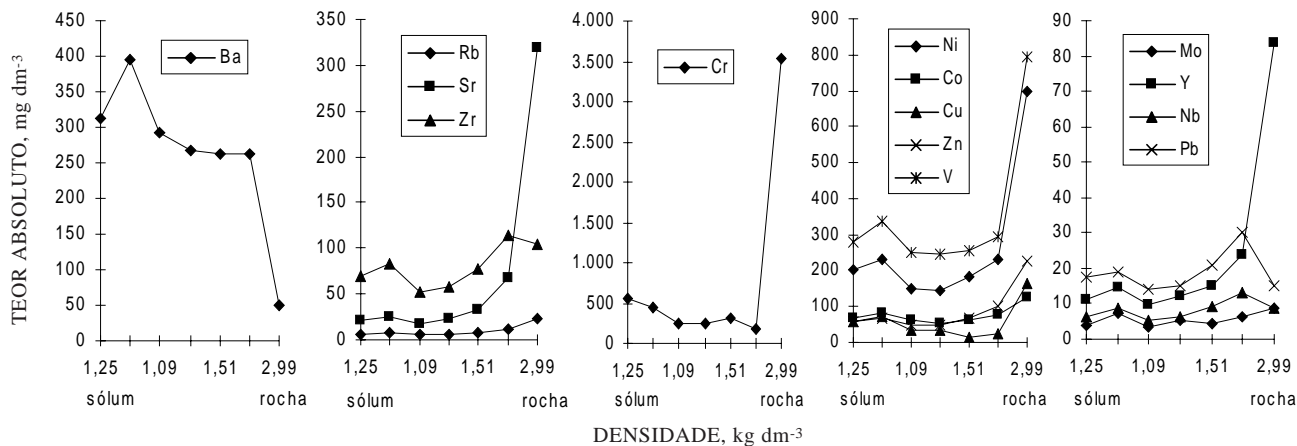
Sendo: A = horizonte A (fácies solum), B = horizonte Bt (fácies solum), BC = horizonte BC (fácies de transição), C = horizontes C (fácies alterito), R<sub>1</sub> = fácies rocha alterada, R = fácies rocha fresca de origem. D = densidade global.



**Figura 1. Diagramas de distribuição dos elementos maiores em teores absolutos em função da densidade para o perfil 1 - PVAd.**



**Figura 2. Diagramas de distribuição dos elementos maiores em teores absolutos em função da densidade para o perfil 2 - Pve.**



**Figura 3. Diagramas de distribuição dos elementos maiores em teores absolutos em função da densidade para o perfil 3 - MTF.**

e os demais apresentam perda moderada em toda a seqüência de alteração a partir do alterito, com perdas médias de cerca de 67% para o Cr, 49% para o Co, 70% para o Cu, 53% para o Zn e 60% para o V. No entanto, verificam-se as menores perdas no horizonte B<sub>t</sub>, o que indica enriquecimento relativo (Quadro 6).

Já no perfil 3 (MTf), ocorrem perdas desses elementos em toda a seqüência de alteração, com valores médios a partir do alterito de -74, -90, -47, -74, -75 e -66%, respectivamente, para Ni, Cr, Co, Cu, Zn e V. Todavia, podem-se verificar menores valores de perda em direção ao solum, especialmente no horizonte B<sub>t</sub>, indicando enriquecimento relativo, tal como no perfil 2 (Quadro 6).

**Mo, Y, Nb e Pb** - Estes elementos mostram comportamento semelhante ao descrito para Ni, Cr, Co, Cu e Zn, menos significativo, considerando os baixos teores absolutos, ou seja: acréscimo no horizonte B<sub>t</sub> com subsequente decréscimo no horizonte A (pouco representativo no perfil 1 (PVAd)), a partir do alterito, e deste até o horizonte BC permanecendo valores com pequenas variações até o horizonte B<sub>t</sub>. Para o Y e Nb, esse incremento no solum ocorre após decréscimo, por vezes acentuado da rocha fresca/rocha alterada ao alterito. O Pb apresenta comportamento distinto nos perfis 2 (PVe) e 3 (MTf), com acréscimo da rocha fresca ao alterito, assim como o Mo no perfil 1 (PVAd) (Quadros 4 e 6, Figuras 1, 2 e 3).

Quanto ao balanço químico (Quadro 6), as perdas médias de Y são cerca de 80, 56 e 83%, respectivamente, para os perfis 1, 2 e 3; e de Nb são de 81 e 49%, respectivamente, para os perfis 1 (PVAd) e 2 (PVe), ambos mostrando discretos menores valores no horizonte B<sub>t</sub>. O Nb no perfil 3 apresenta comportamento distinto, com perda moderada (máximo de -39,24%) nos horizontes BC e A a baixa (-3,01) no horizonte B<sub>t</sub>, após ganhos de magnitude variáveis a partir da rocha fresca ao horizonte C<sub>1</sub>. Os menores valores de perda no horizonte B<sub>t</sub> também indicam enriquecimento relativo desses elementos.

O Mo no perfil 2 (PVe) apresenta perdas variáveis desde -2,36 até -24,82%, mostrando enriquecimento de +4,26% no horizonte B<sub>t</sub>, enquanto, no perfil 3 (MTf), as perdas são moderadas (média de -45%), com menor valor de perda no horizonte B<sub>t</sub>. O perfil 1 (PVAd) é marcado por ganhos de Mo de até +42,08% no solum. O Pb apresenta ganhos nos perfis 2 (PVe) e 3 (MTf) de até 212,77 e 26,09%, respectivamente, nos horizontes B<sub>t</sub>, enquanto o perfil 1 (PVAd) mostra perdas médias de cerca de 62% (Quadro 6).

A migração e a distribuição dos elementos químicos durante os processos de meteorização de rochas e formação de solos, conforme abordado por Carvalho (1995), foram verificadas nos três perfis avaliados. A distribuição dos elementos menores analisados ao longo dos perfis de alteração mostrou a grande mobilidade desses elementos, evidenciando que, no processo pedogenético, alguns elementos

podem ser eliminados e outros concentrados. No entanto, pode-se fazer o grupamento destes elementos de acordo com seu comportamento geoquímico:

- **Classe I:** Elementos de mobilidade moderada a alta, caracterizando perda da rocha fresca ao solum, por vezes mais acentuada da rocha fresca ao alterito: Rb, Sr e Ba, este último nos perfis 1 (PVAd) e 2 (PVe).
- **Classe II:** Elementos de mobilidade moderada, com perda geralmente acentuada da rocha fresca ao alterito e enriquecimento relativo e eventualmente real no solum, especialmente no horizonte B<sub>t</sub>: Ni, Cr, Co, Cu, Zn, V, Mo, Y, Nb, Pb e Zr.

Essa subdivisão, baseada na mobilidade dos elementos menores avaliados, concorda, em linhas genéricas, com a subdivisão clássica proposta por Goldschmidt (1934, 1937), que correlaciona o comportamento dos elementos em reações de meteorização de acordo com o seu potencial iônico. Evidencia, também, conforme relata Besoain (1985), que a eletronegatividade dos elementos pode indicar quais serão eliminados e quais serão concentrados durante a pedogênese.

Assim, a classe I é constituída por elementos de potencial iônico pequeno (< 3), correspondendo ao Grupo I proposto por Goldschmidt (1934, 1937), cujos elementos tendem a se solubilizar, sendo lixiviados do meio; enquanto os elementos agrupados na classe II apresentam potencial iônico maior que 3, correlacionados aos elementos do Grupo II de Goldschmidt (1934, 1937), que se hidrolisam e se precipitam geralmente na forma de hidróxidos.

Os elementos agrupados na classe I (Ba, Rb e Sr), de acordo com Hawkes & Webb (1962), são elementos de mobilidade alta, corroborando o comportamento geoquímico verificado nos perfis estudados. De modo geral, associam-se ao K no feldspato potássico; razão por que seus menores teores encontram-se na seqüência de alteração do perfil 3 (MTf), cuja rocha de origem praticamente não contém este mineral (Lacerda, 1999; Lacerda et al., 2000) e, tal como o K, o comportamento geoquímico do Ba neste perfil fica comprometido.

Na classe II, o Ni, Cr, Co, Cu, Zn e V apresentam características geoquímicas semelhantes segundo Hawes & Webb (1962), ocorrendo nas rochas em minerais ferromagnesianos ou como sulfetos e óxidos primários. Justificam-se, assim, seus maiores teores no perfil 3 (MTf), originado de rocha básica, que revelam a maior proporção de minerais ferromagnesianos (clinopiroxênios e anfibólios) (Lacerda, 1999; Lacerda et al., 2000). Os menores teores destes elementos localizam-se no perfil 1 (PVAd), desenvolvido a partir de rocha granítica, estando os teores intermediários no perfil 2 (PVe), formado pela intemperização de rocha diorítica. Excetua-se o Zn, que apresenta magnitude de teores praticamente equivalentes nos três perfis.

Estes elementos, de modo geral, conforme discutido por Hawes & Webb (1962), apresentam mobilidade variável nos solos; no entanto, esta é limitada pela co-precipitação com sesquióxidos de ferro. Precipitam-se nos solos, então, como elementos menores nos sesquióxidos de Fe, Ti e Mn e alguns deles, em especial o Ni e Zn, em estruturas de argilominerais silicatados. Assim, fundamenta-se o comportamento geoquímico nos solos avaliados, com enriquecimento real ou relativo desses elementos nos horizontes B<sub>t</sub>, acompanhando a concentração de sesquióxidos de ferro nesses horizontes, constatada em estudos mineralógicos realizados por Lacerda (1999) e Lacerda et al. (2000). Desta forma, esse enriquecimento relativo no horizonte B<sub>t</sub> é mais notório no perfil 3 (MTf) e subordinadamente no perfil 2 (PVe), por apresentarem maior concentração de sesquióxidos de Fe nos horizontes B<sub>t</sub>.

Os elementos Mo, Y, Nb e Zr, também agrupados na classe II, são de pequena ocorrência nas rochas ígneas comuns, geralmente ocorrendo em minerais primários acessórios, tais como: sulfetos, molibdatos, fosfatos e silicatos, segundo Hawes & Webb (1962). O mais comum em todos os tipos de rochas ígneas, especialmente as ácidas e intermediárias, é o zircão (ZrSiO<sub>4</sub>), que pode apresentar Y e Nb em sua composição química. Assim, podem-se justificar os maiores teores de Zr em associação com Y e Nb no perfil 1 (PVAd) de origem granítica (composição ácida), em que o zircão ocorre como mineral acessório comum, e os menores teores destes elementos são verificados no perfil 3 (MTf), originado de rocha de composição básica.

No solo, Mo, Y, Nb e Zr apresentam mobilidade variável, podendo ser limitada pela presença de sesquióxidos de Fe, minerais argilosos silicatados e ferromolibdenita, no caso do Mo (Hawes & Webb, 1962). O comportamento geoquímico discutido nos

solos estudados, também com enriquecimento relativo e eventualmente real nos horizontes B<sub>t</sub>, pode, então, estar relacionado com a maior concentração no solum de sesquióxidos de Fe e possível enriquecimento relativo de zircão, que é um dos minerais mais resistentes ao intemperismo, além da maior concentração de argilominerais silicatados.

Nas rochas, o Pb participa da estrutura de micas e feldspatos potássicos, além de sulfetos primários. Observa-se, então, o maior teor no perfil 1 (PVAd), que apresenta as maiores proporções de micas e feldspatos potássicos na sua constituição mineralógica original (Lacerda, 1999; Lacerda et al., 2000). No solo, de acordo com Hawes & Webb (1962), apresenta mobilidade geralmente baixa, limitada, tal como nos elementos acima discutidos, pela co-precipitação com sesquióxidos de Fe, além da matéria orgânica. Pode-se, assim, compreender seu comportamento geoquímico nos solos avaliados, com enriquecimento nos perfis 2 (PVe) e 3 (MTf), que apresentam maiores concentrações de sesquióxidos de Fe.

### Elementos das terras raras

A distribuição dos elementos das terras raras (ETR) mostrou-se bastante variável ao longo dos perfis 1, 2 e 3, cujos teores absolutos encontram-se no quadro 5. Os diagramas de distribuição de acordo com a densidade correspondem à seqüência da evolução da alteração ao longo dos perfis 1, 2 e 3 (Figuras 4, 5 e 6), enquanto o balanço químico é apresentado no quadro 7. Os dados geoquímicos dos elementos das terras raras mostram a mobilidade destes elementos no ciclo intempérico para as condições estudadas, concordando com as observações de Nesbitt & Taylor (1979), Duddy (1980), Banfield & Eggleton (1989), Formoso et al. (1989) e Gasparetto & Menegotto (1995).

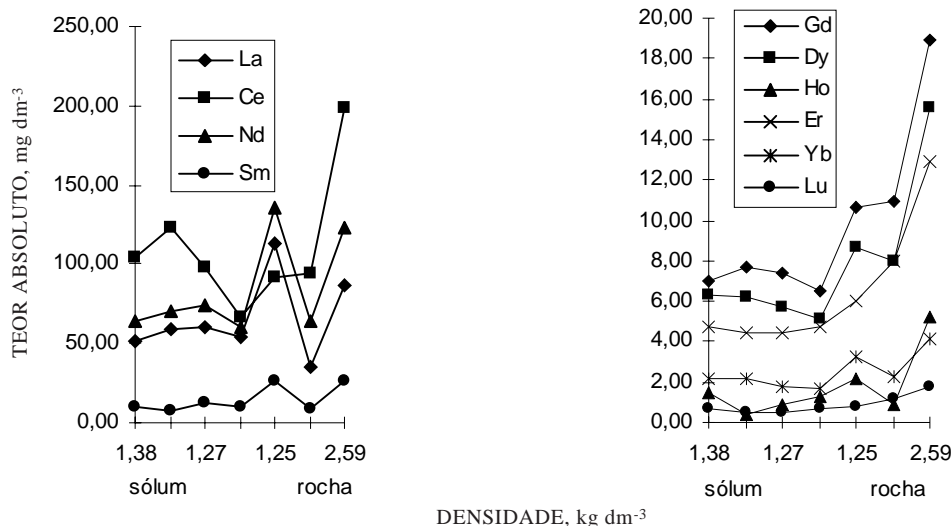
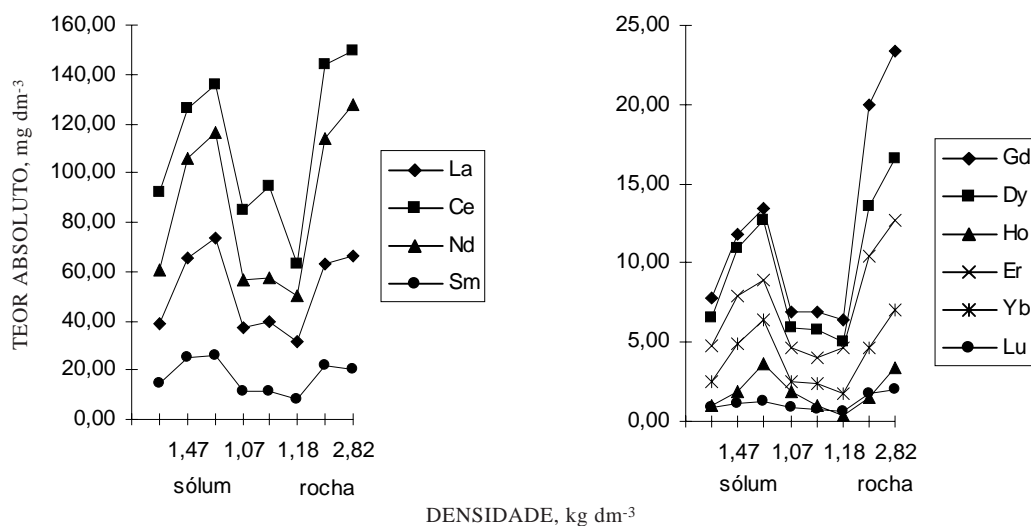
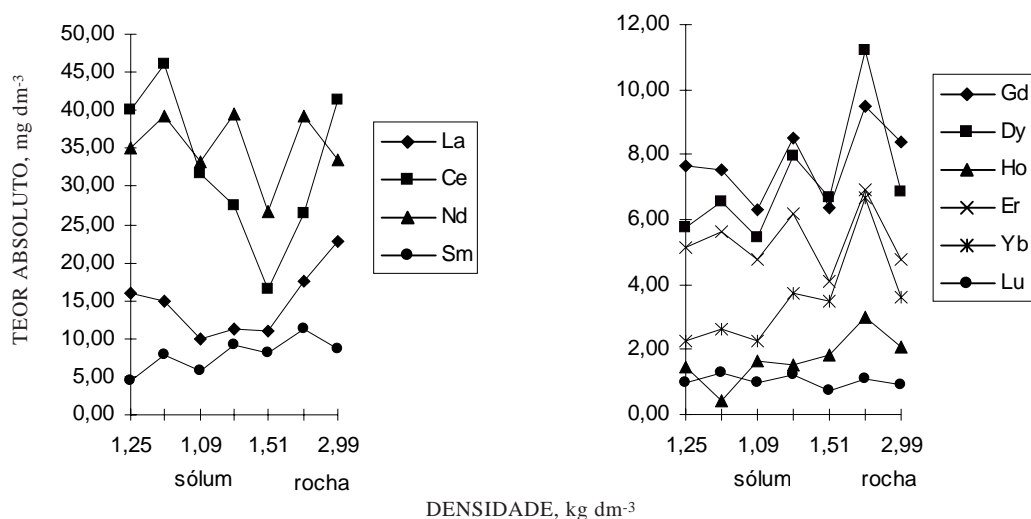


Figura 4. Diagramas de distribuição dos ETR em função da densidade para o perfil 1 (PVAd).



**Figura 5. Diagramas de distribuição dos ETR em função da densidade para o perfil 2 (PVe).**



**Figura 6. Diagramas de distribuição dos ETR em função da densidade para o perfil 3 (MTf).**

No entanto, algumas tendências de distribuição dos ETR podem ser discutidas. Ao longo da sequência de alteração intempérica, a tendência genérica observada é a de perda, geralmente moderada, a partir da rocha fresca até o sólum, apesar das variações observadas ao longo dos horizontes pedogenéticos (Quadro 7).

O padrão de distribuição dos ETR no perfil 2 (PVe) segue a mesma tendência verificada para os elementos menores: perda da rocha fresca ao alterito (horizonte C<sub>3</sub>), permanecendo a valores absolutos praticamente equivalentes até o horizonte C<sub>1</sub>, seguidos de acréscimo em direção ao horizonte BC, com subsequente decréscimo no sólum. Exceção é feita para o Lu, que mostra teores absolutos de pouca variação em toda a sequência de alteração,

considerando os seus baixos teores (Quadro 5, Figura 5). Quanto ao balanço químico (Quadro 7), as maiores perdas são dos elementos das terras raras pesadas, com valores em torno de 60-70%, e os elementos das terras raras leves mostram perdas moderadas, da ordem de 40-50%. Os ganhos do La, Sm e Ho e as menores perdas dos demais, incluindo o Lu, encontram-se nos horizontes BC e B<sub>t</sub> para todos os demais elementos das terras raras, evidenciando enriquecimento relativo.

No perfil 1 (PVAd), podem-se distinguir dois padrões de distribuição, o primeiro nos ETR leves (La, Ce, Nd e Sm), que apresentam perda da rocha fresca à rocha alterada, da ordem de 50 a 60%, seguida de ganhos variáveis no horizonte C<sub>2</sub> (com exceção do Ce) e perdas moderadas (variando de



**Quadro 7. Balanço químico (isovolumétrico) para os elementos das terras raras - Perfis 1, 2 e 3**

Amostra	D	La	Ce	Nd	Sm	Gd	Dy	Ho	Er	Yb	Lu
	kg dm <sup>-3</sup>	%									
Perfil 1 – Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd)											
A	1,38	-41,01	-47,20	-48,17	-60,04	-62,78	-59,15	-70,69	-63,77	-46,72	-61,94
B	1,35	-31,90	-37,89	-43,17	-68,73	-59,30	-60,04	-92,18	-65,60	-47,88	-70,22
BC	1,27	-30,83	-50,52	-39,94	-49,49	-61,04	-63,22	-82,84	-65,68	-57,09	-71,98
C <sub>1</sub>	1,31	-37,68	-66,30	-51,44	-61,56	-65,36	-67,12	-74,71	-63,58	-58,90	-63,87
C <sub>2</sub>	1,25	30,57	-53,56	10,42	2,80	-43,80	-44,50	-58,98	-53,67	-21,57	-58,63
R <sub>1</sub>	2,28	-58,87	-52,71	-48,03	-65,67	-42,12	-48,65	-82,39	-38,38	-44,98	-37,12
R	2,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Perfil 2 – Argissolo Vermelho eutrófico (PVe)											
A	1,28	-41,53	-38,34	-52,40	-29,12	-66,64	-60,76	-69,74	-62,68	-63,69	-54,61
B	1,47	-1,93	-15,61	-16,96	22,82	-49,76	-34,62	-43,53	-37,45	-31,19	-40,43
BC	0,97	10,77	-8,94	-8,98	27,22	-42,81	-23,63	8,92	-29,68	-9,19	-36,12
C <sub>1</sub>	1,07	-44,05	-43,44	-55,93	-46,98	-70,74	-64,63	-43,09	-62,90	-63,57	-56,64
C <sub>2</sub>	1,06	-40,59	-36,67	-55,26	-46,96	-70,56	-65,60	-71,81	-68,26	-66,92	-62,41
C <sub>3</sub>	1,18	-52,30	-57,84	-60,93	-61,60	-72,78	-69,50	-89,54	-63,74	-74,89	-70,11
R <sub>1</sub>	2,60	-5,85	-3,97	-10,45	4,83	-14,47	-18,74	-53,90	-18,05	-33,62	-7,80
R	2,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Perfil 3 – Chernossolo Argilúvico férrico (MTf)											
A	1,25	-30,14	-2,76	4,89	-49,54	-8,92	-16,39	-28,33	7,13	-37,29	11,48
B	1,45	-34,28	11,75	16,91	-9,70	-9,94	-5,12	-79,22	18,21	-27,26	45,48
BC	1,09	-55,87	-23,13	-1,05	-32,12	-24,49	-20,75	-21,88	0,25	-36,20	9,36
C <sub>1</sub>	1,09	-50,59	-33,69	17,83	4,34	1,55	15,70	-27,09	29,87	3,29	33,67
C <sub>2</sub>	1,51	-51,49	-60,11	-20,64	-7,70	-24,25	-3,39	-13,43	-14,78	-3,21	-15,83
C <sub>3</sub>	2,16	-23,01	-36,13	17,39	29,54	13,52	63,33	44,48	44,48	86,62	20,40
R	2,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Sendo: A = horizonte A (fácies solum), B = horizonte Bt (fácies solum), BC = horizonte BC (fácies de transição), C = horizontes C (fácies alterito), R<sub>1</sub> = fácies rocha alterada, R = fácies rocha fresca de origem. D = densidade global.

cerca de 30 a 60%) a partir do horizonte C<sub>2</sub>. A partir deste, os valores permanecem pouco variáveis até o solum, com exceção do Ce. O segundo padrão de distribuição refere-se aos ETR pesados (Gd, Dy, Ho, Er, Yb e Lu), que mostram perda geralmente crescente, com variações ao longo dos horizontes, da rocha fresca ao solum (perdas da ordem de 40 a 90%). A distribuição dos teores absolutos ao longo da sequência de alteração para o Lu apresenta-se tal como no perfil 2 (Quadro 5 e 7, Figura 4).

Já no perfil 3 (MTf), é difícil estabelecer um padrão de distribuição regular para os ETR, distribuição esta marcada por perdas e ganhos alternados ao longo dos horizontes que definem o perfil de alteração. A distribuição dos teores absolutos do Lu mostra poucas variações, tal como nos perfis 1 e 2 (Quadros 5 e 7, Figura 6).

Os dados geoquímicos dos elementos das terras raras mostram a mobilidade destes elementos no ciclo intempérico para as condições estudadas. Apesar de apresentarem potencial iônico > 3, de acordo com a subdivisão proposta por Goldschmidt (1934, 1937), teriam tendência a formar hidróxidos. No entanto, os solos com horizonte B textural, dado o seu grau de evolução, provavelmente não

possibilitam a fixação dos ETR liberados dos minerais em outras partes dos perfis, impedindo sua concentração, concordando com as observações de Gasparetto & Menegotto (1995).

A tendência genérica verificada é de perda, geralmente moderada, com algumas exceções. No perfil 2 (PVe), observa-se padrão mais uniforme de distribuição dos ETR, encontrando-se ganhos de La, Sm e Ho e as menores perdas para os demais ETR nos horizontes BC e B<sub>t</sub>, evidenciando enriquecimento relativo.

Por meio desses resultados analíticos obtidos para os perfis 1, 2 e 3, foi possível avaliar a variação da composição química dos elementos menores e das terras raras ao longo das sequências de alteração, desde a rocha fresca até o solum. Os cálculos volumétricos e balanço químico de massa permitiram analisar o comportamento da mobilidade e distribuição dos elementos químicos avaliados ao longo da evolução pedogenética, bem como quantificar suas perdas e ganhos.

As magnitudes dos teores dos elementos menores e elementos das terras raras ao longo dos perfis de alteração são compatíveis à composição química dos

seus materiais originais, ou seja, rocha de composição ácida (granítica) para o perfil 1 - Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; rocha de composição intermediária (diorítica) para o perfil 2 - Argissolo Vermelho eutrófico, e rocha básica para o perfil 3 - Chernossolo Argilúvico férrico. A variação química sofrida ao longo da sequência de alteração pedogenética, da rocha fresca em direção ao solum, é proporcional aos teores originais.

No entanto, verifica-se comportamento geoquímico semelhante para os perfis em questão, que pode ser caracterizado como reflexo do processo pedogenético e grau de evolução dos solos com horizonte B textural. O comportamento geoquímico nos perfis avaliados é marcado, em linhas genéricas, pela perda acentuada da maioria dos constituintes químicos, nas primeiras fases da alteração, do fácies rocha-fresca ao alterito, mostrando que a alteração processa-se rapidamente a partir do início da atuação intempérica.

### CONCLUSÕES

1. Os dados geoquímicos, obtidos ao longo das sequências de alteração para os perfis 1 (PVAd), 2 (PVe) e 3 (MTf), mostram magnitudes compatíveis aos teores dos elementos menores e elementos das terras raras com a composição geoquímica dos seus materiais de origem, com variação química ao longo das sequências de alteração proporcional aos teores originais.

2. Os cálculos volumétricos e o balanço químico de massa permitiram a avaliação da mobilidade dos elementos químicos estudados ao longo da sequência de evolução da alteração pedogenética, com estabelecimento de perdas e ganhos. Verificou-se o comportamento geoquímico semelhante para os três perfis estudados, sendo caracterizado como reflexo do processo pedogenético e grau de evolução dos solos com horizonte B textural.

3. O estudo possibilitou o agrupamento dos elementos menores em duas classes de acordo com o comportamento geoquímico: Classe I - Elementos de mobilidade moderada-alta, caracterizando perda da rocha fresca ao solum, por vezes mais acentuada da rocha fresca ao alterito: Rb, Sr e Ba, este último nos perfis 1 (PVAd) e 2 (PVe) e Classe II - Elementos de mobilidade moderada, com perda geralmente acentuada da rocha fresca ao alterito e enriquecimento relativo e eventualmente real no solum, especialmente no horizonte B<sub>1</sub>: Cr, Co, Cu, Zn, V, Mo, Y, Nb, Pb, Zr.

4. Verificou-se grande mobilidade dos elementos das terras raras no ciclo intempérico para as condições estudadas. Os solos com horizonte B textural, dado o seu grau de evolução, provavelmente não possibilitam a fixação dos ETR liberados dos

minerais em outras partes dos perfis, impedindo sua concentração.

### LITERATURA CITADA

- ANDRADE, H.; ALVES, H.M.R.; VIEIRA, T.G.C.; RESENDE, R.J.T.P.; ESTEVES, D.R.; BRASIL, J.P.K. & ROSA, E.R. Diagnóstico ambiental do município de Lavras com base em dados georreferenciados do meio físico: IV – Principais agrupamentos de solos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., Poços de Caldas, 1998. Anais. Poços de Caldas, Universidade Federal de Lavras/Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998, v.4. p.442-443.
- BANFIELD, J.F. & EGGLETON, R.A. Apatite replacement and rare earth mobilization, fractionation and fixation during weathering. *Clays Clay Miner.*, 37:113-127, 1989.
- BESOAIN, E. Mineralogía de arcillas de suelos. San José, Costa Rica, Instituto Interamericano de Cooperacion para la Agricultura, 1985. 1205p.
- BONIFAS, M. Contribution à l'étude géochimique de l'alteration latéritique. Mem. Serv. Carte Géol. d'Alsace et Lorraine, 17, 1959. 159p.
- CARVALHO, I.G. Fundamentos da geoquímica dos processos exógenos. Salvador, Bureau Gráfica e Editora, 1995. 213p.
- DUDDY, I.R. Redistribution and fractionation of rare earth and other elements in a weathering profile. *Chem. Geol.*, 30:363-381, 1980.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de método de análise de solo. Rio de Janeiro, 1979a. não paginado.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de solos. Súmula da X Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 1979b. 83p. (SNLCS - Série Miscelânea, 1)
- FORMOSO, M.L.L.; MELFI, A.J. & KRONBERG, B.I. Comportamento dos elementos terras raras no intemperismo tropical. In: FORMOSO, M.L.L.; NARDI, L.V.S. & HARTMANN, L.A., eds. Geoquímica dos elementos terras raras no Brasil. CPRM/ DNPM/SBGq, 1989. p.109-120.
- GASPARETTO, N.V.L. & MENEGOTTO, E. Comportamento dos elementos terras raras na intemperização de rochas vulcânicas ácidas em clima subtropical. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 5.; CONGRESSO DE GEOQUÍMICA DOS PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA, 3., Niterói, 1995. Resumos. Niterói, Sociedade Brasileira de Geoquímica, 1995. (CD-ROOM)
- GOLDSCHMIDT, V.M. Drei vorträge über geochemie. *Geol. Fören. Förhandl.*, 56:385-427, 1934.
- GOLDSCHMIDT, V.M. The principles of the distribution of chemical elements in minerals and rocks. *J. Chem. Soc.*, 40:655-673, 1937.

- HANSON, G.N. Rare earth elements in petrogenetic studies of igneous systems. *Ann. Rev. Earth Plan. Sci.*, 8:371-406, 1980.
- HAWES, H.E. & WEBB, J.S. *Geochemistry in Mineral Exploration*. New York, Elsevier, 1962. 377p.
- HENDERSON, P. *Rare earth element geochemistry*. London, British Museum Natural History, 1984. 369p.
- LACERDA, M.P.C. *Correlação geo-pedológica em solos B texturais na região de Lavras, MG*. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 1999. 257p. (Tese de Doutorado)
- LACERDA, M.P.C.; ANDRADE, H. & QUEMÉNEUR, J.J.G. *Micropedologia da alteração em perfis de solos com B textural na região de Lavras, Minas Gerais*. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:829-841, 2000.
- LEMO, R.C. & SANTOS, R.D. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. 2 ed. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1984. 45p.
- MILLOT, G. & BONIFAS, M. Transformations isovolumétriques dans les phénomènes de laterisation et de bauxitisation. *Bull. Serv. Carte Géol. d'Alsace et Lorraine*, 8:3-20, 1955.
- NANCE, W.B. & TAYLOR, S.R. Rare earth element and crustal evolution. 2 - Archean sedimentary rocks from Lalfloorlie, Australia. *Geochim. Cosmoch. Acta*, 41:225-231, 1977.
- NESBITT, H.W. & TAYLOR, S.R. Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite. *Nature*, 279:206-210, 1979.
- QUEMÉNEUR, J.J.G. *Os magmatismos de idade Arqueana e Transamazônica na Região Campo das Vertentes, MG (Sul do Cráton São Francisco), com base em geoquímica e geocronologia*. Belo Horizonte, CPMTC/UFMG, 1995. 79p. (Relatório inédito)